



⑪ 1.578.562

## BREVET D'INVENTION

- ②① N° du procès verbal de dépôt ..... 9.334 - Alpes-Maritimes.  
②② Date de dépôt ..... 13 août 1968, à 16 h.  
Date de l'arrêté de délivrance ..... 7 juillet 1969.  
④⑥ Date de publication de l'abrégé descriptif au  
*Bulletin Officiel de la Propriété Industrielle.* 14 août 1969 (n° 33).  
⑤① Classification internationale ..... F 01 d//F 02 k 3/00.
- ⑤④ Rotor de haute performance à pales goupillées.
- ⑦② Invention : Carta Franklin Oliver et Stargardter Hans.
- ⑦① Déposant : UNITED AIRCRAFT CORPORATION, résidant aux États-Unis d'Amérique.
- Mandataire : Cabinet Gendre & Fransen.
- ③① Priorité conventionnelle :
- ③② ③③ ③① *Brevet déposé aux États-Unis d'Amérique le 16 août 1967, n° 660.945 aux  
noms de Carta Franklin Oliver et Stargardter Hans.*

L'invention est relative à des machines à pales ou ailettes rotatives, et plus particulièrement à certains perfectionnements des machines comprenant un rotor équipé de pales dont les embases sont goupillées.

Un exemple bien connu des machines à pales rotatives est le compresseur à écoulement axial utilisé dans les avions à réaction. Le moteur à turbo-soufflante ou à double flux bien connu emploie une soufflante à pales ainsi qu'un compresseur à pales.

Les fréquences de résonance dans les systèmes rotatifs ont évidemment des effets indésirables et dans le projet d'un moteur à réactions on dépense beaucoup de temps pour les éliminer. Beaucoup de rotors dans les moteurs à réaction usuels comportent un montage relativement rigide des embases, talons ou pieds de pales (tel que le montage en sapin ou en queue d'aronde) procurant une rigidité suffisante pour qu'une fréquence propre de flexion d'une pale de rotor soit initialement élevée à la vitesse de rotation nulle pour varier paraboliquement jusqu'à une valeur double à la vitesse nominale du moteur. Ce type de pale (embase fixée) et son montage sur un rotor doivent être conçus soigneusement pour éviter que la fréquence propre de la pale corresponde à la vitesse de rotation du moteur ou à un multiple entier (deux, ou trois fois, ou plus) de cette vitesse. Toutefois, la coïncidence de fréquences d'un rang entier plus élevé avec la vitesse de rotation du moteur est inévitable. Bien que l'excitation des rangs entiers plus élevés soit moins grave que celle du rang fondamental, et bien que des rotors à embase fixées soient conçus pour avoir des vibrations maximales à des vitesses de rotation situées bien au-dessus ou au dessous des vitesses de rotation opérationnelles (celles du roulement au sol, du décollage, de croisière, etc.), il existe des situations dans lesquelles les excitations des rangs plus élevés sont néanmoins intolérables.

Pour surmonter les difficultés relatives aux excitations des pales résultant de résonances à des multiples entiers de la vitesse de rotation du moteur, on a envisagé une construction dans laquelle un axe ou une goupille ronde est chassée à travers le pied de la pale et le rotor pour fixer les pales au rotor. Ce genre de montage sera appelé dans la suite du présent exposé "montage à embase goupillée" et pourrait également être appelé "montage à axe (ou goupille) libre". Etant donné que la force centrifuge agissant sur la pale a des vitesses élevées appelle un couple de réaction autour de la goupille, la fréquence de flexion varie en raison directe de la vitesse de rotation. Le montage à embase goupillée a une fréquence propre de flexion nulle à l'arrêt. Par conséquent, le montage à embase goupillée peut comporter une variation de la fréquence avec la vitesse du rotor qui ne coupe aucune ligne de rang entier ; autrement dit, la pale n'a aucune résonance à une fréquence qui est un multiple entier de la vitesse de rotation du moteur. Il est bien connu que de telles pales donnent un rotor dont le poids est plus élevé que les rotors à embases fixées tels que le rotor à montage en sapin des pieds. Par conséquent, de tels rotors sont inutilisables dans la plupart des cas mais ont été employés surtout lorsque leurs caractéristiques vibratoires sont indispensables plutôt que le comportement d'un rotor à embases fixées.

En outre, on a constaté l'existence de vibrations auto-excitées dans des

moteurs de grandes performances dont le rotor est très chargé. Pour cette raison, des pales à embase goupillée n'ont pas été utilisées à une grande échelle.

Le but de l'invention est de créer un rotor à embases goupillées de grandes performances aérodynamiques et ayant des vibrations auto-excitées minimales.

5 Selon l'invention, la position sur le rotor, ou la géométrie de détail des assemblages à embase goupillée varie entre pales adjacentes sur le rotor d'une machine à pales rotatives afin de diminuer sensiblement les effets des variations de pression et de vitesse provoqués par une perturbation de l'équilibre d'une pale susceptible d'être communiquée à la pale adjacente. Selon un mode de mise en oeuvre de l'in-  
10 vention, la position radiale nominale de la goupille d'embase sur une pale est différente de la position radiale nominale de la goupille d'embase des pales adjacentes. Selon d'autres modes de mise en oeuvre de l'invention, le jeu entre la goupille d'embase et le trou de goupille sur le rotor et/ou la pale est différent pour des pales successives. Selon encore un autre mode de mise en oeuvre de la présente invention, la dimension de la goupille d'embase, ou la dimension, soit des trous de pales, soit  
15 des trous de rotor pour la goupille est différente pour des pales adjacentes. Selon encore d'autres modes de mise en oeuvre de la présente invention, différentes combinaisons des différences dans la position ou dans les détails géométriques des assemblages à embase goupillée de pales successives peuvent être utilisées.

20 Un mode de mise en oeuvre spécifique de la présente invention utilise des pales à embase goupillée disposées sur un rotor dont les trous de réception des goupilles sont positionnés à deux ou trois distances radiales différentes du centre de sorte que les pales se divisent en groupes de deux ou trois, chaque pale d'un groupe étant goupillée à une distance radiale différente sur le rotor, chaque groupe étant  
25 similaire aux autres. En outre, la dimension de la goupille de pales disposées à une distance radiale donnée est différente de la dimension de la goupille des pales disposées à une distance radiale différente, et dans le même temps, le jeu entre la goupille et le trou pour chaque pale diffère de celui des pales adjacentes disposées à une distance radiale différente. On atteint ainsi non seulement les buts de l'inven-  
30 tion, mais on peut également assembler les pales rapidement, les goupilles étant identifiables en fonction de la distance radiale à laquelle elles sont disposées.

Différents modes de mise en oeuvre préférés de l'invention seront maintenant décrits à titre d'exemples avec référence aux dessins annexés sans que la demanderesse entende limiter la portée de son invention aux particularités ou par les particu-  
35 larités des exemples. Dans les dessins annexés :

la figure 1 est une vue en bout schématisé de pales de rotor à embase goupillée pour illustrer les forces aérodynamiques en jeu ;

les figures 2 et 3 illustrent le rapport moyeu/sommet ou moyeu/tête ;

la figure 4 est une élévation de profil de détail d'une pluralité de pieds  
40 de pales goupillés où les goupilles sont disposées dans des trous situés sur des cercles décalés, les diamètres des goupilles et le jeu variant selon les cercles des trous selon un premier mode de mise en oeuvre de la présente invention ;

la figure 5 est une élévation de profil de détail d'une pale à pied goupillé selon un autre mode de mise en oeuvre de l'invention.

L'avènement de moteurs d'avions plus puissants et de vitesses plus élevées, a créé un besoin de poussées beaucoup plus grandes des moteurs à double flux à soufflante et on a pensé jusqu'à présent que les pales à embase goupillée ne pouvaient convenir pour ces moteurs à soufflante.

- 5 On a constaté que la fatigue dans les rotors à pales goupillées d'une conception moderne est due à la présence d'un flutter ou flottement de flexion très accentué à une fréquence qui n'est pas un multiple entier de la vitesse de rotation du moteur. Comme on le savait déjà, il se manifeste une flexion de buffeting ou de flottement à des multiples non entiers de la vitesse de rotation du moteur, et à la première
- 10 fréquence propre de flexion de la pale et qui est aléatoire dans le temps. Elle se manifeste normalement à une vitesse élevée lorsque les pales sont très chargées. On a également découvert que les vibrations de flexion des pales de moteurs modernes peuvent comprendre une vibration auto-entretenu essentiellement sinusoïdale d'une amplitude constante très élevée. Ainsi, une vibration auto-excitée d'une pale bien agencée
- 15 à une amplitude où toutes les pales de l'étage oscillent à exactement la même fréquence diffère du buffeting de flexion déjà connu et une fréquence de flexion qui n'est pas un multiple entier de la vitesse de rotation du moteur diffère des résonances de rangs entiers déjà connues.

- L'invention est basée sur la notion que la défaillance par fatigue de flexion occasionnée par le flutter de flexion important d'une amplitude constante importante et d'allure sinusoïdale a une fréquence qui est un multiple<sup>non</sup> entier de la vitesse du rotor est un flutter de flexion cohérent mettant à contribution une pluralité de pales et qui résulte de l'inter-action aérodynamique entre pales oscillantes, renforcée par la cohérence des fréquences pale-pale et par l'existence d'un angle de phase
- 25 entre pales permettant la transmission d'énergie le long de la rangée de pales. On estime qu'il s'agit d'une instabilité aéroélastique résultant de l'inter-action de différentes forces aérodynamiques avec la dynamique physique des pales à talons goupillés. Une théorie qui n'a pas encore pu être prouvée à tous égards et qui semble expliquer le comportement de rotor à talons goupillés d'une conception aérodynamique
- 30 moderne peut être comprise à l'aide des figures 1 à 3. Par exemple, la vitesse de l'écoulement de l'air dans le compresseur du moteur est un écoulement vectoriel résultant ( $V_{rel}$  sur la figure 1) comprenant une composante axiale ( $V_{ax}$ ) résultant de l'entrée d'air  $i$  à l'avant du moteur, et de la vitesse rotationnelle relative ( $V_{rot}$ ) de l'air résultant de la rotation  $r$  de la machine autour de l'axe  $a$  (l'écoulement
- 35 rotatoire effectif étant indiqué sur la figure 1 en  $e$ ). Lorsque la vitesse de l'air augmente de plus en plus dans les projets aérodynamiquement très étudiés, une condition de nombre de Mach critique se manifeste à l'extrados des pales de compresseur 10 à 13. A un nombre de Mach suffisamment élevé, l'accélération de la masse d'air le long de l'extrados 14 de la pale conduit à une condition de nombre de Mach critique
- 40 dans laquelle une onde de choc 15 à 18 se détache à chaque pale en direction de la pale adjacente. Cette onde de choc peut s'étendre entièrement jusqu'à une pale adjacente, ou, comme le montre la figure 1, seulement s'étendre sur une partie du passage 19 à 21 entre pales adjacentes. Dans les deux cas, l'onde de choc exerce

une influence dominante sur l'écoulement et la pression de l'air dans les passages entre deux pales adjacentes. Ce nombre de Mach critique est compris entre 0,6 et 0,9 selon la courbure locale de l'extrados 14 de la pale, comme il est bien connu. A l'état d'équilibre, le choc occupe une place préférée 24 dans le sens de la corde, et la position de l'onde de choc correspond à une fraction déterminée de la longueur de la corde entre le bord d'attaque 26 et le bord de fuite 28 de la pale. La position du choc sur la corde dépend de la répartition de la pression et, inversement, la répartition de la pression dépend de l'emplacement sur la corde de l'onde de choc. Il peut y avoir une inter-action entre ces deux paramètres indépendants de telle sorte que si la pale s'éloigne de sa position d'équilibre, la pression dans le passage (ou intervalle) change ce qui provoque une modification de la position de l'onde de choc. Ceci modifie la répartition de la pression dans des pales adjacentes ou voisines. A leur tour ces pales répondent par déflexion et changement de la répartition de la pression dans des passages supplémentaires, provoquant un effet d'avalanche ou de boule de neige. Par exemple, lorsqu'il existe une perturbation de l'équilibre dans la pale 11, elle modifiera la pression et la position des ondes de choc 15, 16 à l'intérieur des passages 19 et 20 entre les pales 10, 11 et entre les pales 11, 12 de sorte que les pales 10 et 12 sont également déséquilibrées. A leur tour, ces dernières transmettent une variation de pression aux passages suivants dans les deux directions, tels que le passage 21 entre les pales 12 et 13, et perturbent la position d'équilibre de la pale 13, et ainsi de suite, créant ainsi l'effet de boule de neige ou d'avalanche susmentionné.

On estime qu'une combinaison du nombre de Mach relatif existant à l'entrée de la pale (le nombre de Mach de l'écoulement d'air à Vrel) et du rapport moyeu/tête (ou moyeu/sommet) crée ou favorise l'instabilité. Ceci peut résulter d'un nombre de Mach relatif supérieur au nombre de Mach critique local pour l'étage combiné avec un rapport moyeu/tête élevé ou même avec un faible rapport moyeu/tête lorsque le nombre de Mach relatif est suffisamment élevé pour dépasser le nombre de Mach critique local uniformément le long d'une partie substantielle de la longueur de la pale.

Comme on le sait (voir la figure 2), le rapport moyeu/tête résulte de la comparaison de la distance du moyeu 30 d'une pale 31 avec la distance de l'axe du rotor du sommet ou tête 32 de la pale. La figure 2 montre un faible rapport moyeu/tête et la figure 3 montre un rapport moyeu/tête élevé.

Si le rapport moyeu/tête est suffisamment élevé, il existera un nombre de Mach relativement constant le long de l'envergure de la pale (du moyeu au sommet). D'autre part, si un faible rapport moyeu/tête existe, la variation du nombre de Mach le long de l'envergure peut être très importante. Si la répartition du nombre de Mach le long de l'envergure est à peu près constante, une grande partie de l'envergure sera au nombre de Mach critique, dès que le nombre de Mach total ou global est suffisamment élevé. Ce nombre de Mach critique affecte une partie substantielle de la pale plutôt que de n'intéresser qu'une région locale de la pale. Par conséquent, les effets d'un nombre de Mach critique peuvent consister en ce qu'une proportion plus grande des inter-actions aérodynamiques totales agissent sur la pale et ainsi la tendance d'une perturbation en boule de neige sera nettement accentuée par rapport aux pales

a faible rapport moyeu/tête. Dans un rotor ayant un faible rapport moyeu/tête, la variation de la vitesse est suffisamment grande pour que l'extrémité radiale intérieure de la pale présente, par exemple, un nombre de Mach de 0,4, alors que le sommet présente, par exemple un nombre de Mach de 0,9 et dans ce cas seulement le sommet de la pale sera dans la zone du nombre de Mach critique (0,6 à 0,9) et subira d'une façon notable les effets susmentionnés.

L'instabilité aéroélastique qu'on vient de décrire se manifeste dans le cas d'une excitation de toutes les pales de la série à exactement la même fréquence et produit un flutter de flexion cohérent et dont la nature est celle des vibrations dans les rotors à pales goupillées d'une conception aérodynamique très poussée. Une interruption entre deux pales voisines quelconques rompra la continuité de ce système auto-excité et retardera ou interdira l'amorçage de l'instabilité.

Pour résoudre ces problèmes et interrompre la cascade d'effets interdépendants du phénomène susindiqué d'une pale à la pale suivante, on désaccorde les fréquences de telle façon que les effets deviennent aléatoires plutôt que d'être de la nature d'une onde cohérente se propageant complètement autour du rotor. Lorsque les résonances sont les mêmes, de l'énergie est facilement transmise d'une pale à la suivante. Par contre, si les pales ont des fréquences propres différentes, l'énergie transmise d'une pale à la suivante sera moins efficace étant donné qu'elle n'est pas à la fréquence de résonance de la pale et on consomme davantage d'énergie pour briser l'équilibre aérodynamique.

Une analyse des pales disposées sur un rotor au moyen de goupilles libres, appelées dans le présent exposé pales à embases (ou talons) goupillées est donnée dans le document ayant pour titre "Some Vibration Characteristics of Pin-Fixed Compressor Blades" par MM. J.I. Goatham et G.T. Smailes présenté à la session annuelle d'hiver de la American Society of Mechanical Engineers en Novembre/Décembre 1966 à New York, état de New York, Document N° 66-WA/GT-4. Dans cette étude, on traite en détails du comportement dynamique de compresseurs à pales à embases goupillées, y compris les vibrations, la répartition des contraintes de flexion, les fréquences propres et les positions de défaillance attendue. Par conséquent, on ne donnera pas dans le présent exposé une analyse dynamique et mathématique théorique de la géométrie des goupilles de talon, mais on se contente de donner cette référence bibliographique.

En bref, une pale à embase goupillée telle que représentée sur la figure 5, fonctionne principalement comme un pendule rigide libre en rotation, à l'intérieur de limites assez étroites, autour de la goupille 40 l'assujettissant sur un rotor. Le trou 42 dans le rotor 43 et le trou 44 dans la pale 45, traversés par la goupille de fixation, ont chacun un diamètre plus grand que celui de la goupille elle-même ce qui permet aux pièces de rouler plutôt que de glisser avec friction.

Comme il ressort de l'article susindiqué, le degré de roulement qui peut avoir lieu est une fonction de la géométrie de la goupille 40, du trou de rotor 42 et du trou de pale 44 (voir la figure 5). Lorsque la pale 45 subit une perturbation, elle a tendance à tourner autour de la goupille 40, la surface radialement intérieure 46 du trou de pale 44 étant pressée contre une surface adjacente de la goupille 40 par une force centrifuge très importante et la pale entraînera la goupille 40 en rotation avec

elle. Ce phénomène est à peu près analogue à celui d'une lourde planche roulant sur un rondin ou billot. Etant donné que la goupille 40 tourne avec la surface 46 de la pale 45, elle a également tendance à tourner sur une surface 48 du trou de rotor 42. Le résultat est que la goupille 40 roule effectivement le long de la surface du trou de rotor 42 radialement à l'intérieur de sorte que la pale 45 ne bascule pas seulement, mais est également ramenée radialement vers le centre à la suite de ce basculement ; la force centrifuge agissant sur la pale en opposition à ce mouvement radial centripète conférant à la pale une rigidité pour laquelle l'article susmentionné donne l'analyse mathématique.

10 En supposant que la pale 45 soit perturbée de façon à tourner dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport à la figure 5, le point de contact 46 sur le trou de pale 44 se déplacera de droite à gauche par rapport à la figure 5, provoquant la rotation dans le sens trigonométrique de la goupille 40. Cette rotation dans le sens trigonométrique de la goupille 40 amène la goupille à descendre sur la figure 5  
15 le long du côté gauche du trou de rotor 42, le centre de rotation de la pale 45 se déplaçant alors légèrement vers la gauche et vers le bas par rapport à la figure 5. Ce phénomène peut facilement être vérifié en imaginant les surfaces 46 et 48 linéaires, la surface 46 étant un objet mobile qu'on roule sur un rouleau (goupille 40) par rapport à un plan de référence (surface 48).

20 Il est donc clair que si la goupille 40 avait un diamètre beaucoup plus petit que les trous de rotor et de la pale 42, 44, un faible degré de translation de la pale 45 aurait lieu à la suite d'un déplacement angulaire donné. D'autre part, si le diamètre de la goupille 40 était égal à celui des trous 42, 44 (sauf un petit jeu permettant le roulement susmentionné), il n'y aurait pratiquement pas de translation  
25 de la pale 45 ni à droite, ni à gauche à la suite de la rotation de la pale 45. De même, le roulement serait différent si les dimensions des trous 42 et 44 n'étaient pas égales et si le diamètre du trou de rotor 42 était très grand par rapport aux diamètres de la goupille et du trou de pale 44, une translation importante de la pale 45 aurait lieu à la suite d'une petite rotation de celle-ci. Par contre, si le  
30 diamètre du trou de pale 44 était beaucoup plus grand que celui de la goupille 40 et si le diamètre du trou de rotor 42 était seulement légèrement supérieur au diamètre de la goupille 40, une rotation importante de la pale 45 provoquerait seulement une translation minime d'un centre de rotation de la pale.

Comme le montre la figure 4, une pluralité de pales 50 à 55 est dans cet  
35 exemple montée à l'aide de goupilles 60 à 65 à des distances radiales différentes 70 à 72 sur le rotor. Comme exposé dans l'article susmentionné, la distance radiale séparant la masse de la pale du centre de rotation du rotor 74 est à l'origine d'une rigidité propre différente de la pale. On le comprend facilement, étant donné qu'un déplacement donné du sommet de la pale diminue le nombre de degrés de rotation d'une  
40 pale ayant un arc plus long (telle que les pales 52 et 55) par rapport au nombre de degrés pour des pales ayant un arc plus court (telles que les pales 50 et 53). Avec un nombre de degrés de rotation plus faible de la pale, en réponse à une perturbation donnée, il y aura une plus faible tendance pour un déplacement latéral de la pale (comme décrit ci-dessus par rapport à la figure 5). La fréquence de la pale est donc

inversement proportionnelle à la racine carrée de la distance entre l'axe du rotor et le centre de gravité de la pale. La pale plus courte aura donc une fréquence propre plus élevée en raison des dimensions et de la géométrie ou configuration des goupilles. Les goupilles 60 à 65 disposées à différentes distances radiales 70 à 72 du centre du rotor<sup>74</sup> peuvent également avoir des dimensions correspondantes ou aléatoires. Par exemple, si les goupilles 60 et 63 sont les plus petites et si les goupilles 62 et 65 sont plus grandes que les goupilles 61 et 64, la dimension des goupilles contribuera à rendre les fréquences des pales 50 et 53 inférieures à celles des pales 51 et 54 qui seront à leur tour supérieures à celles des pales 52 et 55. Par conséquent, à la fois la distance radiale (70 à 72) et la dimension des goupilles ont une influence similaire sur les rapports entre les fréquences propres des pales 50 à 55. On peut utiliser n'importe quelle combinaison de dimensions de goupilles et de trous avec différentes distances radiales, comme le montre la figure 4. Un mode de mise en oeuvre préféré de l'invention prévoit toutefois une géométrie ou dimension donnée de goupilles et trous pour chaque distance radiale (70, 71, 72), la géométrie des embases étant différente pour chacune des distances radiales. D'autre part, on peut marquer les goupilles en couleurs pour éviter des erreurs de montage et pour être sûr que les bonnes goupilles soient placées aux différentes distances radiales. Evidemment, les pales peuvent être montées sur le rotor 74 seulement à deux rayons différents (par exemple 70 et 71) de sorte que chaque deuxième pale soit au même rayon, les pales successives étant à des rayons différents.

Les différentes combinaisons de distances radiales (70 à 72), de dimensionnement des trous de pale 44, de dimensionnement des trous de rotor 42, du diamètre des goupilles 40 et du jeu entre les goupilles 40, les trous de pale 44 et les trous de rotor 42 sont données dans le tableau de variances ou variations donné ci-après dans lequel le mot "variation" désigne : différence entre deux pales adjacentes, ou entre trois pales dans une rangée, ou entre une série de N pales, N étant un nombre raisonnable quelconque. En d'autres termes, le tableau de variations illustre les combinaisons de variations susceptibles d'être faites entre pales pour créer des fréquences propres différentes dans des pales adjacentes d'une série de pales en rompant l'avalanche d'effets aérodynamiques décrite ci-dessus.



TABEAU DE VARIATIONS

	Variation de distances radiales (70 à 72)	Variation de dimensions goupilles 40	Variation de trous rotor 42	Variation de trous pales 44	Variation de jeu goupilles rotor 40, 42	Variation de jeu goupilles pales 40, 44
1.		X			X	X
2.		X	X		X	X
3.		X	X			X
4.		X		X	X	X
5.		X		X	X	
6.			X		X	
7.				X		X
8.			X	X	X	X
9.		X	X	X		
10.		X	X	X	X	
11.		X	X	X		X
12.		X	X	X	X	X
13.	X	X			X	X
14 à 23	X	(comme 2 à 13 ci-dessus)				
24.	X	X	X	X	X	X

Comme exemple typique, on considèrera un moteur d'avion produisant une poussée élevée et qui comprend une soufflante de second étage ayant des pales d'une longueur inférieure à 30 cm, utilisant un rotor dans lequel chaque trou a un diamètre égal à 1,09 fois le diamètre des goupilles (jeu de 9%), toutes les goupilles et tous les trous étant approximativement identiques et ayant des diamètres de l'ordre de 13 mm fonctionnant à une vitesse inférieure à la pleine vitesse et produisant un flutter de flexion cohérente variant entre 14.100 kg/cm<sup>2</sup> et 21.100 kg/cm<sup>2</sup>. Après avoir augmenté le diamètre des goupilles d'environ 3 ou 4% dans chaque deuxième pale, il ne se manifeste plus de flutter de flexion notable à aucune vitesse, même à survitesse. On a constaté qu'une différence appropriée de la fréquence de résonance globale de pales adjacentes est de 5% ou plus et cette différence peut être obtenue avec une variation de 3 à 20% de la géométrie, unique ou en combinaison, indiquée dans le tableau de variations ci-dessus.

Alors que l'invention a été décrite à l'aide de quelques modes de mise en oeuvre préférés, il est évident qu'on peut y apporter des modifications de forme et de détail sans quitter le cadre de l'invention.

#### R E S U M E

1. Rotor à embases goupillées comprenant une pluralité de pales disposées sur le rotor au moyen de goupilles traversant des trous dans les pales et dans le rotor, les goupilles traversant les trous dans les pales et dans le rotor avec suffisamment de jeu pour permettre un roulement entre les goupilles et les trous, caractérisé par le fait qu'au moins une caractéristique de chaque pale diffère de la caractéristique correspondante de la pale adjacente prise dans le groupe de variations caractéristiques du tableau de variations ci-dessus.

2. Rotor à embases goupillées selon le paragraphe 1, caractérisé par le fait que les pales sont disposées dans une pluralité de groupes, les pales de chaque groupe s'alternant avec les pales d'au moins un groupe complémentaire, les pales de chaque groupe différent dans leurs caractéristiques des pales d'au moins un groupe complémentaire en au moins une des variations et caractéristiques représentées au tableau de variations.

3. Rotor à embases goupillées selon le paragraphe 1, caractérisé par le fait que chaque trou du rotor est situé à une distance radiale différente de celle du trou adjacent.

4. Rotor à embases goupillées selon le paragraphe 1, caractérisé par le fait que les goupilles, les trous des pales et les trous du rotor ont des diamètres appropriés de telle façon que le jeu entre une goupille et au moins l'un des trous pour chaque pale soit différent du jeu entre la goupille et au moins l'un des trous pour une pale adjacente sur le rotor.

5. Rotor à embases goupillées selon la paragraphe 1, caractérisé par le fait que la goupille pour chaque pale sur le rotor a un diamètre différent de celui de la goupille pour une pale adjacente sur le rotor.

FIG. 1

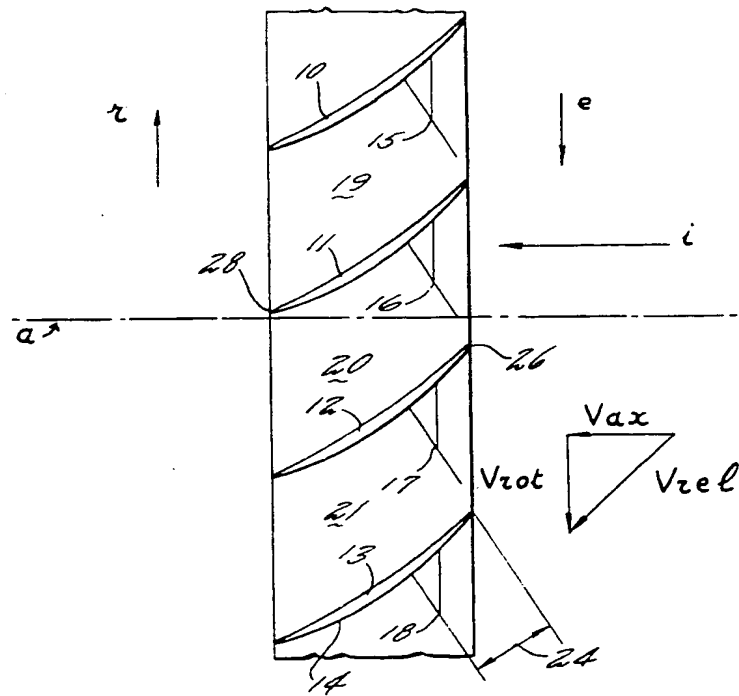


FIG. 2

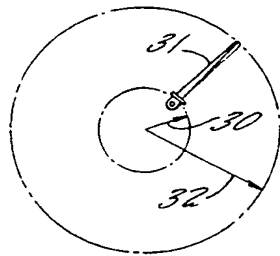


FIG. 3

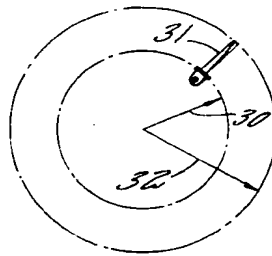


FIG. 4

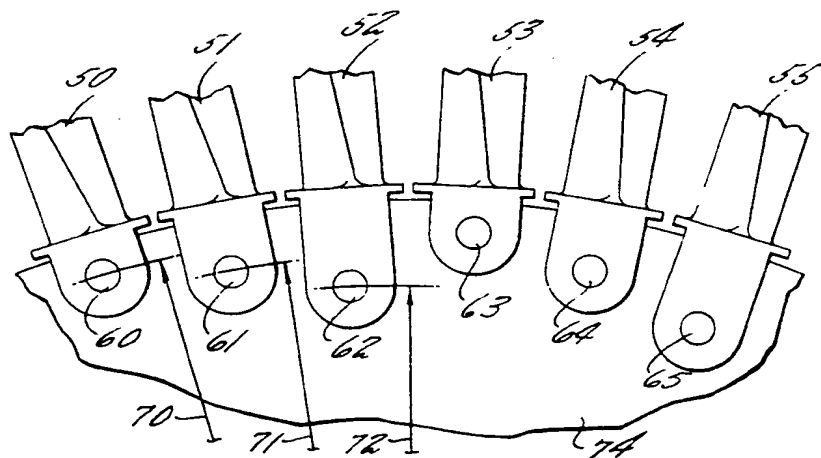


FIG. 5

